

國術騰空飛腳動作運動控制與協調 系列研究之一

——運動學與地面反作用力特徵以及各關節的協調配合

¹劉宇、²陳重佑、¹莊榮仁、²黃長福

¹中國文化大學 ²國立臺灣師範大學

摘 要

本系列研究的目的是以生物力學的研究方法探討「騰空飛腳」動作的運動控制與協調的機制及其對實踐的指導意義。第一部分的研究是以影片分析法(120Hz)和測力板分析法(600Hz)同步收集五位優秀武術選手「騰空飛腳」動作的運動學和動力學參數，以探討下肢各關節的運動學和地面反作用力特徵，作為進一步分析下肢各關節控制力矩及其協同作用效果奠定基礎。角對角座標分析結果顯示「騰空飛腳」起跳階段的支撐腿踝關節與膝關節均是同步完成先曲屈後伸展的協調作用形式，而髖關節則是在初期先伸展後才與膝、踝協同變化。角—力座標的分析說明了水平方向地面反作用力扮演著降低運動員水平速度的機制，而垂直方向的最大地面反作用力產生於下肢關節的最大彎曲階段，為伸展下肢關節創造了良好的初始條件。騰空後，手腳擊打動作是在身體重心達到最大高度之前完成，作用腿下肢三關節的角速度最大值均出現在手腳擊打前。

關鍵詞：生物力學、國術、騰空飛腳、角對角座標、角—力座標

Effects of Task Constraints on Throwing Pattern of Elementary School Students

壹、緒論

「騰空飛腳」動作在傳統的中國武術中又稱為「二起腳」，是亞運武術競賽中的指定動作，亦為臺灣地區和大陸地區中學或體育院校的中國武術課程內容。根據亞運武術競賽套路的規定，「騰空飛腳」是運動員在二步以內的助跑後，以左腳為擺動腳向前上方帶動身體往上，並以右腳為起跳腳起跳離地，離地後隨即再以右腳為作用腿向前踢出，爾後再兩腳同時落地（龐林太和李文英，1989）。而現今國內和國際武術競賽的優秀運動員，則通常採用右腳起跳、右腳踢腿、右腳落地的運動形式。

「騰空飛腳」的生物力學研究中，李暉(1990)曾以測力板系統分析起跳時的左腳擺動技術對垂直地面反作用力的影響，並指出直擺式的動作較屈擺式的動作跳得高，而國內與國際的優秀武術選手也多半採用直擺式的技術起跳。陳帝佑等人(1997)以影片分析探討騰空飛腳助跑階段的技術，並指出助跑時要逐步降低身體重心，並通過最後一步前的仰身增加髖關節的角度；此一研究的結果與陳重佑和黃長福(1996)發現起跳階段的最大軀幹仰角與重心提昇高度成正相關的結果一致。除了以上的研究外，尚有鄭仕一和洪得明(1994)以定性分析的方法探討「騰空飛腳」的技術。劉宇(1998)報告指出，運動學測量與分析，僅可對運動的效果(the effect)進行定量描述，動力學的地面反作用力(外力)的測量與分析亦只能夠探討外力對運動的影響及外力與運動學參數之間的關係，要想深入理解運動，必須對控制人體運動的關節力矩進行分析(見系列研究之二)。本系列研究的目的是以生物力學的研究方法探討「騰空飛腳」動作的運動控制與協調的機轉(mechanism)，及其對實踐的指導意義。第一部分的研究目的主要是探討下肢各關節的運動學和地面反作用力特徵，為進一步分析下肢各關節控制力矩及其協同作用效果奠定基石。

貳、研究方法

本研究的研究對象是以國內優秀武術長拳選手五名進行實驗測試，這些選手或為國家代表隊選手、儲備選手，或為區運優秀選手。其年齡、身高、體重、拳齡平均分別為： 19.6 ± 2.8 歲、 166.0 ± 3.5 公分、 60.8 ± 5.0 公斤、 2.5 ± 1.6 年。

實驗時以一部 Peak 高速攝影機拍攝受試者的「騰空飛腳」動作，拍攝的頻率為 120Hz，快門為 1/2000，高速攝影機拍攝頻率為 120Hz、快門為 1/2000，攝影機鏡頭中心與測力板的直線距離為 20 公尺，取景範圍寬 6 公尺、高 3 公尺；測力板處理系統的採樣頻率為 600Hz。實驗儀器同步的方法，主要是利用一部同步定位儀(Event Synchronization Unit)作為整個同步訊號傳入與輸出的樞紐。

本研究的運動學資料 (Kinematic Data) 是使用 Peak Performance 5.2.1 版的二度空間動作分析系統，點取影片中武術騰空飛腳動作的人體十七個關節標誌點，並以 Peak Performance 5.2.1 版軟體提供的零相位移數位濾波法 (Butterworth Fourth-order Zero Lag Digital Filter) 將數位化後的原始資料加以修勻，選用的截止頻率 (Cutoff Frequency) 是以系統軟體提供的最佳截止頻率。不同受試者武術騰空飛腳動作起跳階段，起跳腳給予地面的水平與垂直 (X、Y) 二個方向力量的動力學資料 (Kinetic Data)，乃使用 Kistler 9287 型測力板獲得，並使用 BioWare 2.2 板軟體 (Biomechanical Software Analysis System)，計算分析動力學參數，而將原始資料修勻所採用的方法為 12th order Chebyshev type II low pass filter。人體測量學肢段參數資料 (Anthropometric Data)，是 Winter (1990) 書中提供的 Dempster (1955) 人體慣性參數數據。

參、結果與討論

騰空飛腳動作分為助跑、起跳、騰空和落地等四個階段。根據研究的問題，在此僅探討起跳支撐階段和騰空階段。為了表現動作的「勁力協調」與「精神結構風格」，要求起跳後盡可能跳得高並在最高點完成手腳擊打動作，此後則為順勢的後續動作。因此，本研究選取的重要時相有：

- | | |
|-------------------|-----------------------|
| TD：起跳支撐階段作用腳著地瞬時。 | KF：起跳支撐階段最大屈膝瞬時。 |
| TO：起跳支撐階段作用腳離地瞬時。 | HF：騰空階段手腳擊打瞬時。 |
| TD - KF：稱為緩衝期。 | KF - TO：稱為蹬伸期。 |
| TD - TO：稱為起跳支撐期。 | TO - HF：稱為騰空階段擺動腿上擺期。 |

一、運動學特徵

(一) 動作時間

本研究中起跳支撐階段 (TD - TO) 所需時間是 $205 \pm 20\text{ms}$ ；其中緩衝期為 70ms ，佔整個支撐期的 34%；蹬伸期為 145ms ，佔支撐期的 66%。起跳後騰空拍打期所用時間為 $306 \pm 12\text{ms}$ ；起跳後身體重心上升到最大高度所需時間是 $317 \pm 14\text{ms}$ ，由此可見，手腳擊打動作是在身體重心達到最大高度之前完成的。

(二) 作用腿各關節的協調配合

圖 1 為支撐階段作用腿相鄰關節踝—膝和膝—髖關節的角對角座標 (Angle to Angle) 示意圖。箭頭表示曲線起始與變化方向。

圖 1 上圖顯示支撐階段相鄰的踝關節與膝關節的屈伸變化基本上是一致的，隨著踝關節角度的減小，膝關節的角度也逐漸變小，當膝關節角度減少到一定值時（折點 1），踝關節角度繼續減小，而膝關節角度則開始上揚；在折點 2 處，踝關節角度也減至最

小，隨後與膝關節一起上揚至支撐階段結束。

膝—髌關節的變化則稍有不同，初始時，膝關節角度下降，而髌關節角度則有些許上升，而後，髌關節才和膝關節協同變化，一起屈曲至折點處，然後在一起伸展。

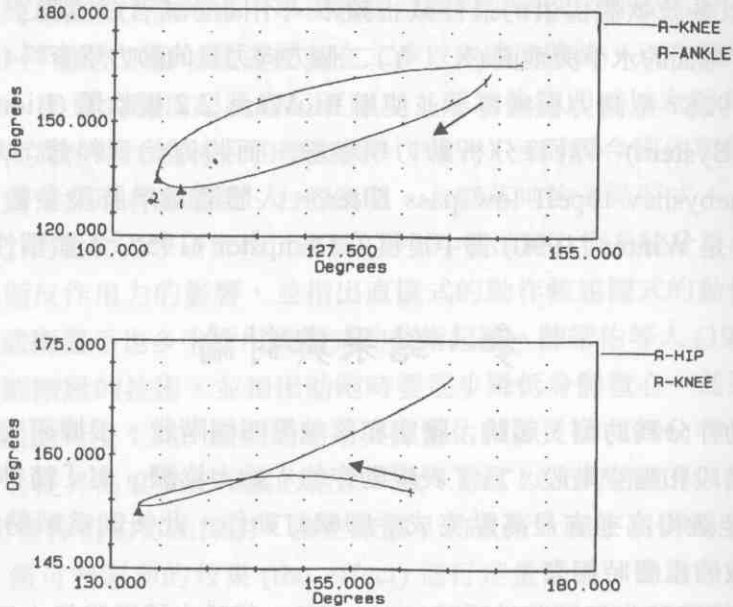


圖 1：起跳支撐階段，作用腿相鄰關節踝—膝（上圖：橫座標為踝，縱座標為膝）和膝—髌（下圖：橫座標為膝，縱座標為髌）關節角對角（Angle to Angle）座標示意圖

如圖 2，騰空階段相鄰關節角對角座標曲線的變化則有些許複雜。騰空後，踝—膝關節（上圖）的變化先後出現 5 個轉折點，才在折點 6 處完成手腳擊打，隨後，曲線在折點 6 附近變化，這說明二關節的關係在此後沒有很大的變化。騰空後，膝—髌關節的角對角變化關係（見圖 2 下圖）則比較簡單，首先隨著膝關節角度的減小，髌關節角度也在減小（至折點 1），隨後，膝關節開始伸展，而髌關節仍持續屈曲，在折點 2 處，也就是手腳擊打瞬間，髌關節屈至最大，此後開始轉為伸展，而膝關節則不再發生明顯變化。

二、起跳支撐期地面反作用力

水平方向的地面反作用力僅在支撐期的初始階段，由於作用腿（腳）著地時相對於地面，有向後的相對運動趨勢，而產生了微小和短暫的正向力，此一現象，在 5 名受試者中，有 3 名如此，其餘在整個支撐期，作用於腳上的水平地面反作用力分力幾乎均為負值，即作用於支撐腳之水平作用力的方向向後，其最大值 $(-1089 \pm 250N)$ ，先於垂

直分力，在下肢各關節還未達最大曲屈時即已出現。在支撐期末期短暫時間內，水平分力非常小，在零線附近波動。

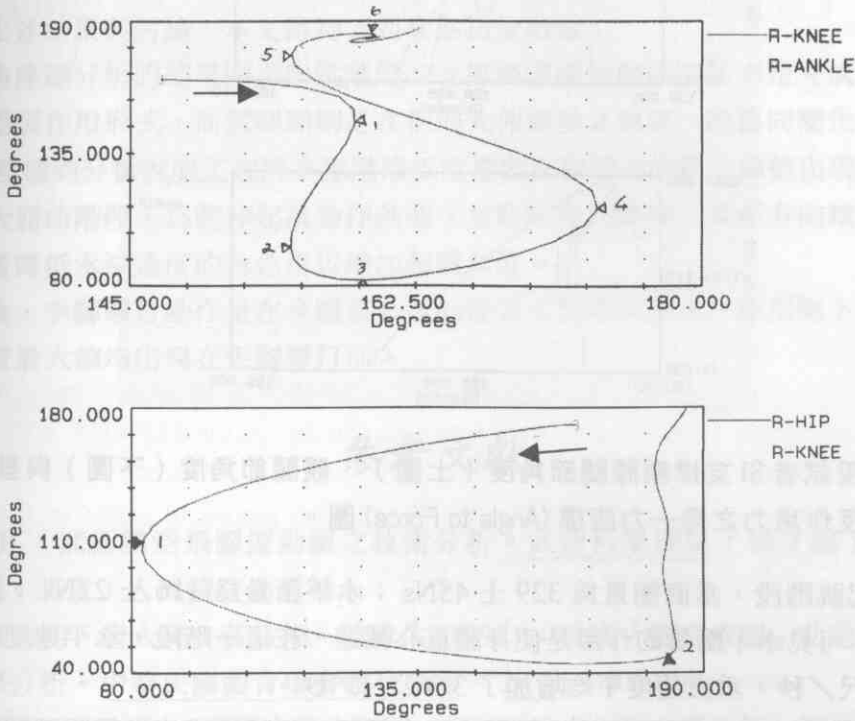


圖 2：騰空階段，作用腿相鄰關節踝—膝（上圖：橫座標為踝，縱座標為膝）和膝—髌（下圖：橫座標為膝，縱座標為髌）關節角對角 (Angle to Angle) 座標示意圖。

垂直分力與其它跳躍起跳動作（如跳高和跳遠）相似，出現兩個明顯的峰值。第一峰值 ($2251 \pm 303N$) 出現在支撐初期，第二峰值 ($-2280 \pm 326N$) 出現在蹬伸階段。根據騰空飛腳起跳動作特點和比較其它跳躍起跳動作的研究結果 (Nigg, 1995)，我們認為第一峰值應是著地初期足跟與地面碰撞 (impact) 產生的。圖 3 表示支撐腿關節角度與垂直地面反作用力關係的角-力座標示意圖，橫座標為關節角度，縱座標為垂直地面反作用力。由角力座標可以觀察分析關節角度的變化與地面反作用力變化之間的關係。根據分析圖 3，膝、髌關節與垂直地面反作用力之間的關係，第二峰值出現在下肢關節最大曲屈階段，是下肢關節屈曲制動（減速）身體向下運動的產物，並且為蹬伸起跳動作（伸展下肢各關節），創造了良好的初始條件，因為這時身體上已經作用了一個較大的垂直向上的作用力，根據動量—衝量定理，力量愈大，衝量亦愈大，起跳速度也將愈大，這樣也為起跳離地做好了準備。

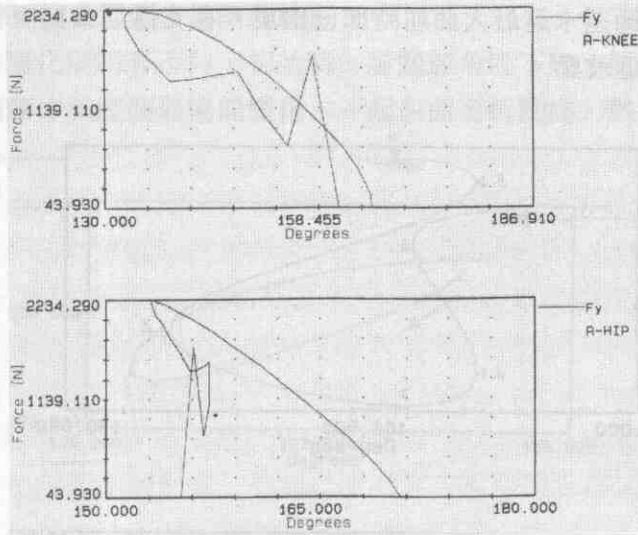


圖 3：受試者 SI 支撐期膝關節角度（上圖）、髖關節角度（下圖）與垂直地面反作用力之角—力座標 (Angle to Force) 圖。

整個起跳階段，垂直衝量為 $329 \pm 45\text{Ns}$ ；水平衝量為 $-116 \pm 22\text{Ns}$ ；因為水平衝量為負值，可見水平衝量的作用是使身體重心減速，在這一階段，水平速度平均共減小了 3.19 公尺/秒，垂直速度平均增加了 3.3 公尺/秒。

綜合上述結果，本研究的分析發現「騰空飛腳」起跳階段的支撐腿踝關節與膝關節的運動特徵，都是同為先曲屈而後伸展的協同運動形式；而髖關節則在起跳階段的初期，先產生伸展的運動形式後，才與膝、踝關節協同變化曲屈，再一起伸展；垂直地面反作用力的第二峰值則是產生於下肢關節的最大曲屈階段。由於陳帝佑等人 (1997) 的研究指出起跳階段的仰身增加髖關節角度，致使膝關節於起跳初期有適宜的彎曲角度；因此本文也發現隨後的膝關節繼續彎曲，在屈至最大時，地面反作用力達到最大值（第二峰值），為蹬伸起跳創造了良好的時機。水平方向的地面反作用力，在整個起跳階段扮演著降低水平速度的角色，用以增加運動員離地的起跳角度，進而提高了跳躍的高度。動作時間的分析表明騰空後手腳擊打動作是在身體重心達到最大高度之前完成，作用腿下肢三關節的角速度最大值均出現在手腳擊打前。而騰空階段的作用腿動作特徵則是髖關節曲屈至手腳擊打後才開始伸展；膝關節則是先曲屈而後伸展直至手腳擊打後，才與踝關節保持伸直的情形，做為落地作準備。

上述這些研究結果，對於了解國術「騰空飛腳」動作的結構，以及各關節的協調配合特徵有著重要的意義，並為進一步深入分析探討關節控制力矩及其協同作用效果的研究打下了基礎。

肆、初步結論

總結上述結果與討論，本文得到下列幾點初步結論：

- 一、角對角座標分析的結果顯示起跳階段的支撐腿踝關節與膝關節均是完成先曲屈後伸展的協調作用形式，而髖關節則是在初期先伸展後才與膝、踝協同變化。
- 二、角-力座標的分析說明了起跳支撐階段垂直地面反作用力的第二峰值出現在下肢關節的最大屈曲階段，為蹬伸起跳動作創造了良好的初始條件；水平方向地面反作用力扮演著降低水平速度的角色用以增加起跳角度。
- 三、騰空後，手腳擊打動作是在身體重心達到最大高度之前完成，作用腿下肢三關節的角速度最大值均出現在手腳擊打前。

參考文獻

- 李暉(1990)：武術騰空飛腳擺動腿之技術分析。武術科學探秘（徐才編），pp.453-457。北京：人民體育出版社。
- 陳帝佑、李志明、唐人屏、黃長福、陳重佑(1997)：武術「騰空飛腳」助跑階段的生物力學分析。中華民國體育學會體育學報，24期，97-108。
- 陳重佑、黃長福(1996)：武術「騰空飛腳」起跳階段之生物力學分析。第二十七屆大學院校運動會國際體育學術論文研討會論文集，pp.383-387。台北：國立臺灣師範大學。
- 鄭仕一、洪得明(1994)：武術競賽動作騰空飛腳之定性分析。國術研究，6期，3-14。
- 劉宇(1998)：從肢段間相互作用的動力學來探討國術中騰空飛腳動作的運動控制。中華民國行政院國家科學委員會成果報告，計畫編號：NSC86-2314-B-034-001。
- 龐林太、李文英(1989)：長拳競賽套路，pp.22-24。北京：人民體育出版社。

投稿日期：87年11月

審稿日期：87年11月

接受日期：88年2月

A Serial Study of Movement Control and Coordination during Jump-Slap-Kick in Chinese Martial Arts. Part I: Characteristics of Kinematics, Ground Reaction Force and Joints Coordination

¹Yu Liu, ²Chung-Yu Chen, ¹Long-Ren Chuang, & ²Chen-fu Huang
¹Chinese Culture University, ²National Taiwan Normal University

ABSTRACT

This serial study based on biomechanical approach aims at exploring the mechanisms of movement control and coordination during jump-slap-kick and giving the perceptual guidance for the practice. The first part of the study was to investigate the characteristics of kinematics and ground reaction forces in order to lay the foundations for further study of joint control torque. The Peak Performance 2D Motion Analysis System (120Hz) and Kisterler forceplatform (600Hz) were used synchronously to acquire the data of kinematics and ground reaction forces from five elite male Chinese martial arts athletes performing jump-slap-kick. The results of angle vs. angle analysis indicated that both the ankle and knee joints of action leg showing the flexion then following by extension movement pattern during the support phase. The hip joint on the other hand showing extension at beginning of the support phase, and then acting conjunctly with knee and ankle joint. The horizontal ground reaction forces acted to reduce the horizontal velocity of athlete's c.g. during the support phase. The maximal vertical ground reaction force occurred at the maximum flexion phase of the action leg. This created an ideal initial condition for the takeoff. During the flight phase, the kicking action, that the hand slapped the foot happened prior to the body c.g. reaching the highest position, and the maximum angular velocity for each joint of the action leg also appeared at a moment before the hand slapped the foot.

Key words: biomechanics, Chinese Martial Arts, jump-slap-kick, angle-angle diagram, angle-force diagram